

氏 名	吉 田 弘
生 年 月 日	
本 籍	東京都
学 位 の 種 類	博士 (理学)
学 位 記 番 号	博甲第278号
学位授与の日付	平成11年3月25日
学位授与の要件	課程博士 (学位規則第4条第1項)
学位授与の題目	大強度相対論的電子ビームで駆動された強いラングミュア乱流状態 プラズマからの広帯域ミリ波放射
論 文 審 査 委 員	(主 査) 増崎 克 (副 査) 河田 脩二, 鎌田 啓一, 安藤 利得, 石塚 浩

学 位 論 文 要 旨

Abstract

High-power broadband millimeter-wave radiation is emitted from a strong Langmuir turbulence plasma driven by an intense relativistic electron beam. We measured directivity and spectrum of this radiation with a filter-bank spectrometer, a heterodyne spectrometer and a filter-waveguide-combination spectrometer covering 18 - 140 GHz. The directivity measurement indicated that the radiation source is the beam electrons accelerated by caviton's electric field. The observed spectra were nearly flat or increased slightly with frequency up to about 40 GHz and decreased steeply above 40 GHz. The spectrum shape was almost the same for the range of plasma density in this experiment. The cutoff frequency of the measured spectrum does not agree with that of the spectrum estimated from the Gaussian type beam fluctuation in the collective Compton boosting model proposed by Benford and Weatherall. The experimentally obtained spectrum was fitted to Gaussian and transformed to the spatial distribution of the beam electrons by the inverse Fourier transform. The width of the distribution was estimated to be 5 mm. Since the width of 5 mm is comparable to the resonant wavelength of the beam-plasma instability, the beam bunching may result from nonlinear growth of the beam-plasma instability. In addition we measured the spectrum of the beam modulation by utilizing the waveguide pickup devised and synchrotron radiation. The beam modulation spectra measured by both methods were similar to the radiation spectrum. This shows that the radiation spectrum depends on the beam modulation.

大強度相対論的電子ビーム (IREB) - プラズマ相互作用により強いラングミュア乱流状態になったプラズマからは、大強度で広帯域なミリ波が放射される。この放射機構を明確にするために、フィルターバンク型スペクトロメータ、ヘテロダイン型スペクトロメータ、導波管-フィルタ組み合わせ型スペクトロメータを用意し、周波数レンジ 18 - 140 GHz にわたり放射電磁波を詳細に測定した。IREB 源としては Physics International 社製の Modified Pulserad 110A を、プラズマ源としては 2 基のレーलगンを利用し、1.4 MV, 27 kA, 30 ns の IREB を非磁化プラズマ中に入射し、放射電磁波の指向性、パワースペクトルを、これらのスペクトロメータにより測定した。観測した放射指向性のピークはビーム伝播方向にたいし $5 - 10^\circ$ にあり、スペクトルは 40 GHz 付近まではフラットか若干右上がり、それ以上の周波数では約 40 dB / oct で急激に減衰するという結果を得た (図 1 (a))。放射指向性のピークとスペクトル形状は、プラズマ密度、ビーム電流、観測位置などを変えてもほとんど変化しなかった。測定されたような指向性とスペクトルをもつ電磁波は、強いラングミュア乱流状態のプラズマ中に局所的に捕捉された高周波振動電場 (キャビトン) により、ビーム電子が加速されて放射されていると考えると実験結果がうまく説明できることがわかった。また、コヒーレントな放射が得られるのは、プラズマ中を伝播する電子ビームが変調を受けているためとわかった。さらに、ビームが変調されているかどうかを確認するために、2 種類のスペクトル計測法を用いビーム変調計測をおこなった。その結果、ビームは変調されており、その変調スペクトルが放射電磁波のスペクトルに影響していることがわかった。

スペクトル観測のために設計製作したスペクトロメータは 18 - 60 GHz をカバーする 3-ch フィルターバンク型スペクトロメータ、68 - 90 GHz の 5-ch ヘテロダイン型スペクトロメータ、73 - 140 GHz 用の 3-ch 導波管-フィルタ組み合わせ型スペクトロメータである。高周波側の測定では、受信パワーが減衰するために、高速パルスアンプを検波後に使用している。いずれのスペクトロメータもガンオシレータもしくはスイーパーを用い較正した。指向性は、ホーンアンテナにより相互作用チャンバー (直径 6 インチ、長さ 600 mm のステンレス製) 端から $0 - 15^\circ$ を 5° きざざみに、チャンバー内にセットした導波管アンテナにより $0 - 30^\circ$ を 10° きざざみにそれぞれ測定した。スペクトル観測は、チャンバーの観測ポートにホーンアンテナを取り付け、ビーム伝播軸に対し径方向から行った。

ホーンアンテナによる指向性測定によると主ビーム角は 5° 、導波管アンテナによる指向性測定の場合は主ビーム角が 10° であった。IREB のエネルギーが $\gamma \sim 4$ であることから、相対論的に電磁波が放射されていれば、放射の主ビーム角 $\sim 1/2\gamma \sim 7^\circ$ となる。これを測定値と比べると良く一致している。この結果と、プラズマが強いラングミュア乱流状態にあっても電子ビームが無くなると放射が止まるということから、キャビトン電場により加速されたビーム電子が放射源でありそうなることがわかった。さらにこの結果を、集団コンプトンブースティングモデルで計算した指向性と比較した。Benford と Weatherall [1, 2] が提案したこのモデルは、放射源としてキャビ

トン電場で加速された荷電粒子を考え、コヒーレントな放射は電子ビームの密度揺動によると考えた唯一もっともらしい理論モデルである。モデルによれば、キャビトンダイポールモーメントがビーム電子の速度にたいし平行な場合と垂直な場合により、単電子からの放射指向性と放射スペクトルが変化する。モデルの計算結果によるとキャビトンダイポールモーメントとビームが平行の時に主ビーム角が約 10° になる。また、平行な場合は垂直な場合と比べて、 $1/\gamma^2$ だけパワーが低下する。これらのことから、私たちの場合には、キャビトンダイポールモーメントはほとんどビームに対して平行であると推測できた。この結果は、静電波がビーム-プラズマ不安定性で励起されるということを考えてみると自然である。平行配置の場合の単電子からの放射スペクトルは、私たちの観測レンジでは、若干右肩上がりのスペクトルとなる。

大強度の電磁波が放射されるためには、それぞれの電子から放射された波がコヒーレントに重ね合わされるメカニズムが必要である。コヒーレントな放射があるためには、ビームの密度揺動を考慮する必要がある。一つの電子から放射されるパワースペクトルを $I(k)$ 、ビーム変調のスペクトル密度関数を $f(k)$ 、バンチに含まれる電子数を N とすると、全体としてのコヒーレントな放射スペクトル $P(k)$ は、 $P(k) = I(k)N^2f(k)$ となる [3]。ここで、スペクトル密度関数は、ビームの密度分布 $S(x)$ のフーリエ変換の絶対値の二乗であらわされる。集団コンプトンブースティングモデルで考えているとおり、ビーム電子の密度揺動（つまりビーム変調）が放射スペクトルに影響しているとして、モデルの中で提案されていた4種類のスペクトル密度関数 [1] を利用して、私たちの測定結果にフィットさせることを試みた。スペクトル形状はガウシアン型のスペクトル密度関数を用いた場合に似通っていたが、定量的に一致するものはなかった。そこで、得られた周波数スペクトルを $\omega = vk$ の関係を用いて波数スペクトルに変換した後、ガウシアンでフィットし、フーリエ逆変換でビームの密度空間分布を求めた。ここでビーム速度 $v = \text{constant}$ とした。フィットカーブを図 1 の (a) に、求めたビームの形状を (b) にしめす。分布はガウシアン型で半値幅が 5 mm 程度となり、この値

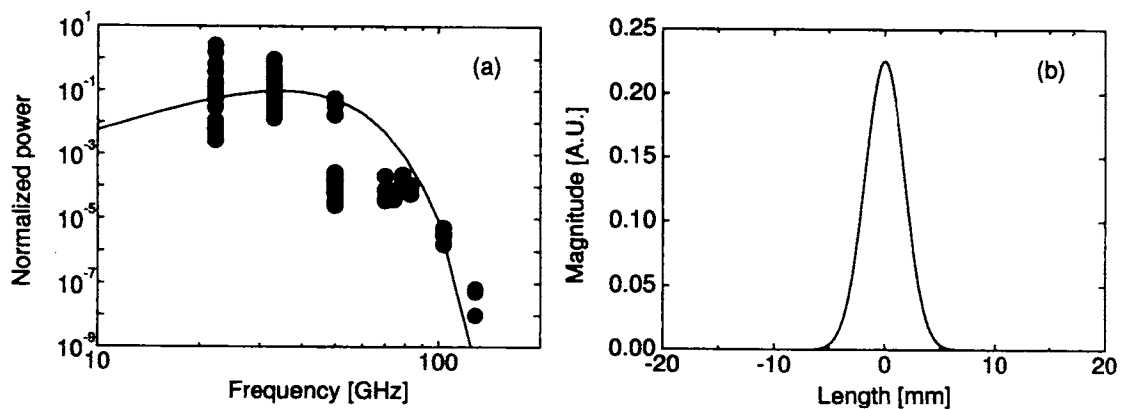


Figure 1: (a) An obtained spectrum at $f_p \sim 16$ GHz. Dots show experimental values. Curve shows the Gaussian fit spectrum taking into account the single particle spectrum. (b) The beam distribution estimated from the fit curve by Fourier transform.

をビーム-プラズマ不安定性の共鳴波長と比較したところ、同程度であった。このことからビーム変調はこの不安定性が種でありそうだと推定できた。モデルではビーム変調には、ビーム-プラズマ不安定性でなく、キャビトン電場が影響すると考えていたために異なった結果を得たこともわかった。

ビーム変調計測には、導波管ピックアップによる測定とシンクロトロン放射の測定の2つの方法を用いた。導波管ピックアップは、導波管のブロードサイド両側に数ミリのスリットを設けたもので、変調ビームを入射スリットを通し、導波管内を通過させると、導波管モード(主に TE_{n0} モード)とカップリングし、管内に電磁波が励起される。管内を通過し出口スリットから出たビームは、そのビーム電流を測定するために小型のファラデーカップにより受け止める。励起された電磁波は導波管により導かれ、前述のスペクトロメータで観測する。シンクロトロン放射によるビーム変調測定は、チャンバーエンドにパーマネントマグネットを配置し、マグネットの磁場でビーム電子が偏向し、そのときに放射するシンクロトロン放射光を、ホーンアンテナで受信する。マグネットの前面にはアルミフォイルを張り、IREB-プラズマ相互作用により放射される電磁波を遮断し、さらにプラズマの進入を防いでいる。いずれの方法も、特有の周波数レスポンスを有しているので、計算によってあらかじめ周波数特性を計算し、測定値を補正できるようにした。これら二つの方法をもちいて、ビーム変調スペクトルを測定した。その結果いずれの測定方法でも、電子ビームは変調を受けているという事がわかった。さらにそれぞれのスペクトルと、ミリ波放射測定から推定したビーム変調スペクトルを、それぞれの測定器の周波数レスポンスで補正したスペクトルと比較したところ、だいたい一致した。以上のことから、確かにビームは変調されており、コヒーレントな電磁波放射はビームが変調されている事に起因するとわかり、よって、放射スペクトルはビーム変調のスペクトルに依存するということがわかった。

一方、放射電磁波の放射パワーと、導波管ピックアップで測定した変調ビームによる励起電磁波のパワーを、プラズマガン点火からビーム入射までの遅れ時間をパラメータとしておのおの測定した。両者を比較したところ、パラメータの変化に対するパワーの変化が良く似ていた。ピックアップの励起電磁波のパワーは変調度に依存するので、パラメータの変化により、プラズマ中を伝播するビームの変調度が変化することで、放射パワーが変化していると推測できる。この結果により、ビームの変調スペクトルが放射電磁波のスペクトルに影響しているということがさらに裏付けられた。尚、これまでの研究で確認されていた、強いラングミュア乱流状態であっても電磁波放射が観測できなくなることがあり、電磁波の放射強度はビーム密度とプラズマ密度の比が0.01の時に最大になるという現象は、ビームの変調状態の変化によっているといえそうである。また、集団コンプトンブースティングモデルはキャビトンの存在をあらかじめ仮定しており、乱流の状態を含んでいなかったが、この結果によれば、乱流状態のパラメータはビーム変調に含まれていると考えることができる。

以上のように、IREBでドライブされた強いラングミュア乱流状態のプラ

ズマから放射される大強度で広帯域なミリ波の放射機構をある程度明確にできた。しかし、ビームの変調メカニズムについては、まだ検討が不十分であるので今後の研究に期待したい。

References

- [1] G. Benford and J. C. Weatherall, Phys. Fluids, B4 (1992) 4111
- [2] J. C. Weatherall and G. Benford, Astrophys. J. 378, (1991) 543
- [3] J. S. Nodvick and D. S. Saxon, Phys. Rev. 96, (1954) 180

学位論文審査結果の要旨

本論文について、論文内容および参考資料についての各審査委員の個別検討の結果、および2月5日に開催された口頭発表会での発表および質疑応答の結果を踏まえて、口頭発表会直後に開催された審査委員会において以下のように判定した。

本論文は、大強度相対論的電子ビームと非磁化プラズマとの相互作用の結果強いラングミュア乱流状態になったプラズマからの高出力広帯域ミリ波放射について、その指向性およびスペクトルについて詳細な実験を行い、このミリ波放射源がキャビトン電場と相互作用するビーム電子であること、およびビームがパンチしていることで高出力が得られることを確かめ、さらにビーム・パンチの大きさを推定したことを記述している。

本論文で得られた主な研究成果は次のとおりである。

1) ミリ波放射の指向性を測定し、ビーム進行方向に相対論的にビーミングしていることを見い出した。このことと、ミリ波放射がビームが続いている間しか観測されないということからこのミリ波放射源がキャビトン電場と相互作用しているビーム電子であることを確認した。またその指向特性からキャビトン電場のダイポール・モーメントのほとんどがビーム進行方向に平行であることを示した。2) 3組のミリ波スペクトロメーターを製作し、このミリ波放射のスペクトルを測定した。高出力放射であるため、ビームがパンチしていることが予想されたが、測定されたスペクトルの形からビーム・パンチの形状を推定した。3) 新しく考案した導波管ピックアップ法およびプラズマ外に取り出したビームによるシンクロトロン放射のスペクトル測定より、ビームがパンチしていることをさらに確認した。

以上の研究成果はビームにより駆動された強いラングミュア乱流状態の研究に有用な知見をもたらしたもので、本論文は博士論文に値するものと判定した。また、申請者は今後自立して研究を行うに必要な能力と学識を有していると認められ、博士の学位を受けるに値すると判断した。